

Opinnäytetyö (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

Energia- ja polttomoottoritekniikka

2017

Juhani Harju

# AGCO POWER 74 AWF - TYÖKONEDIESELMOOTTORIN LÄMMÖNHALLINTATUTKIMUS

Juhani Harju

## AGCO POWER 74 AWF - TYÖKONEDIESELMOOTTORIN LÄMMÖNHALLINTATUTKIMUS

Tämä opinnäytetyö on osa moottoritutkimusta, jonka tavoitteena on saada moottori vastaamaan tulevia päästönormeja etenkin hiukkaspäästöjen osalta. Hiukkaspäästöjen rajoitusten tiukentuessa joudutaan ottamaan käyttöön hiukkassuodatin, joka lisää vaatimuksia moottorin raakapäästöjen sekä pakokaasun lämpötilan osalta.

Työssä tutkittiin mahdollisuuksia nostaa pakokaasujen lämpötilaa erilaisilla parametrimuutoksilla, sekä uutena menetelmänä tutkittiin mahdollisuutta pakoläpän käyttöön moottorin pakokaasujen lämmönhallinnassa. Hiukkassuodattimen regeneroitumista transienttisykliä aikana tutkittiin modifioituilla parametreilla.

Tutkimukset suoritettiin AGCO Powerin toimeksiannosta. Tutkimukset Turun ammattikorkeakoulun polttomoottorilaboratoriossa ajoittuivat kevääseen ja kesään 2016, jona aikana suoritettiin lukuisia eri testiajoja.

Käytettäessä pakoläppää pakokaasujen lämpötilan nostamiseen huomattiin, että polttoaineen ominaiskulutus on suurempi verrattuna imuläpän käyttöön. Myös päästöissä havaittiin eroja käytettäessä pakoläppää lämmönhallintaan. Regenerointitutkimuksessa havaittiin hiukkassuodattimen regeneroitumisen olevan huomattavasti nopeampaa käytettäessä parametreja, joilla pakokaasujen lämpötila oli korkeampi.

### ASIASANAT:

Lämmönhallinta, pakoläppä, imuläppä, regenerointi, pakokaasut, jälkikäsitteily, hiukkassuodatin

Juhani Harju

## AGCO POWER 74 AWF ENGINE THERMAL MANAGEMENT TESTS

This thesis is part of an engine research the purpose of which is to develop an engine that meets the future emission standards for particulate emissions. In future, most engines will be equipped with a diesel particulate filter to meet the newest emission standards. The use of a diesel particulate filter increases requirements of engine's raw emissions and exhaust gas temperatures.

The study focused on engine thermal management, which means controlling the exhaust gas temperature by means of parameter changes and by reducing the air mass flow. As a new method, the use of exhaust gas choking valve for reducing air flow was tested. The regeneration of a diesel particulate filter during a transient cycle was tested with the reference and modified parameters.

The research was made in cooperating with AGCO Power. The tests took place in spring and summer 2016 and were made at the engine research laboratory of Turku University of Applied Sciences. During the time, several static and transient test drives were made.

The use of an exhaust valve influenced on the specified fuel consumption by raising it, compared to the use of a throttle valve. There were also notable differences in emissions between these two methods. The regeneration of a diesel particulate filter was significantly faster with the modified parameters than with the reference parameters.

### KEYWORDS:

Thermal management, exhaust gas, aftertreatment, particulate filter, dpf, regeneration, throttle valve, exhaust gas valve

# SISÄLTÖ

<b>KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO</b>	<b>6</b>
<b>1 JOHDANTO</b>	<b>7</b>
<b>2 PAKOKAASUJEN JÄLKIKÄSITTELY</b>	<b>9</b>
2.1 SCR-katalysaattori	9
2.2 Hiukkassuodatin	11
2.3 Pakoputken vastapaineen vaikutus	15
<b>3 KOEJÄRJESTELYT</b>	<b>17</b>
3.1 Moottori	17
3.2 Jälkikäsitteilylaitteisto	17
3.3 Dynamometri	18
3.4 Mittauslaitteisto	18
3.4.1 Pakokaasupäästöt	18
3.4.2 Muut mittalaitteet	19
3.4.3 Polttoaine	19
3.5 NRTC-sykli	19
<b>4 PAKOLÄPPÄTUTKIMUS</b>	<b>21</b>
<b>5 LÄMMÖNHALLINTATUTKIMUS</b>	<b>22</b>
<b>6 REGENEROINTITUTKIMUS</b>	<b>23</b>
<b>7 YHTEENVETO</b>	<b>24</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>26</b>

## KAAVAT

Kaava 1. SCR-reaktioyhtälö (Dieselnet 2016c).	9
Kaava 2. Ammoniakin hapetus (Dieselnet 2016c).	10
Kaava 3. NO <sub>2</sub> -avusteinen regenerointi (Dieselnet 2016e).	13
Kaava 4. FSN-kaava.	19

## KUVAT

Kuva 1. Stage V -päästörajoitukset (Dieselnet 2016a).	9
Kuva 2. Toimintalämpötilat eri SCR-katalyyteille (Dieselnet 2016c).	10
Kuva 3. Hiukkassuodattimen regenerointi (Dieselnet 2016e).	12
Kuva 4. NO <sub>2</sub> -avusteinen regenerointi (Dieselnet 2016e).	13
Kuva 5. CSF-NO <sub>2</sub> -regenerointi (Dieselnet 2016f).	14
Kuva 6. Vastapaineen vaikutus lambdaan (Dieselnet 2016g).	16
Kuva 9. NRTC-sykli (Dieselnet 2016b).	20

## TAULUKOT

Taulukko 1. Moottorin tiedot.	17
Taulukko 3. Pakokaasupäästöjen mittalaitteet.	18

## KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO

ASC	Ammoniakin jälkikäsittely (Ammonium slip catalyst)
SCR	Selektiivinen NO <sub>x</sub> -jälkikäsittely (Selective catalytic reduction)
DPF	Hiukkassuodatin (Diesel particulate filter)
CSF	Katalysoitu hiukkassuodatin (Catalyzed soot filter)
DOC	Hapetuskatalysaattori (Diesel oxidation catalyst)
NRTC	Transienttisykli (Nonroad transient cycle)
SFC	Polttoaineen ominaiskulutus (Specific fuel consumption)
PM	Hiukkaspäästöt (Particulate matter)
HC	Hiilivetypäästöt (Hydrocarbon)
NO <sub>x</sub>	Typenoksidit (NO ja NO <sub>2</sub> )
CO	Hiilimonoksidi
FSN	AVL-savutuslukema (Filter smoke number)

# 1 JOHDANTO

Tulevat päästönormit asettavat moottorivalmistajille suuria haasteita kehitettäessä moottoreita, jotka vastaavat uusiin päästönormeihin. Nonroad-moottoreihin vuonna 2019 tuleva stage V -päästöluokitus asettaa tiukempia rajoja dieselmoottoreiden hiukkaspäästöille. Nykyisessä stage IV -päästönormissa PM-päästöjen raja on 0.025 g/kWh kun taas stage V -normissa se on 0.015 g/kWh. Hiukkaspäästörajan tiukentuminen tulee lisäämään hiukkassuodattimien käyttöä moottoreissa.

Moottorivalmistajille hiukkassuodattimen lisääminen aiheuttaa suuria haasteita, kun moottorin käytös, toimintavarmuus ja polttoaineenkulutus olisi pidettävä entisellään tai jopa parannettava asiakkaiden tyytyväisyyden takaamiseksi. Valmistajien on mietittävä raakapäästöjen ja pakokaasujen jälkikäsittelylaitteiden tehokkuuden suhdetta tarkasti.

Hiukkassuodattimen ja SCR-katalyyttien toiminnan kannalta pakokaasujen lämpötila on ratkaisevaa. SCR-järjestelmät vaativat riittävän suuren lämpötilan, jotta typen oksidien vähentäminen tapahtuu tehokkaasti. Hiukkassuodatin taas kerää itseensä nokea, joka lopulta aiheuttaisi suodattimen tukkeutumisen. Hiukkassuodattimen tukkeutumista edesauttaa epätäydellinen palaminen moottorissa. Riittävän suurella pakokaasujen lämpötilalla varmistetaan suodattimen ”puhdistuminen” eli käytännössä nokihiukkaset palavat pois ja tätä kutsutaan suodattimen regeneroitumiseksi.

Pakokaasujen lämpötila ei aina ole riittävä katalyyttien optimaalisen toiminnan takaamiseksi eikä myöskään hiukkassuodattimen regeneroitumisen aikaansaamiseksi. Pakokaasujen alhainen lämpötila yhdistettynä huonoon palamiseen, etenkin kylmissä olosuhteissa, on huono yhdistelmä ajatellen pakokaasujen jälkikäsittelylaitteita. Pakokaasujen lämpötila ei aina riitä normaaliolosuhteissakaan, kun moottori toimii pienellä kuormituksella.

Tässä työssä keskitytään pääasiassa dieselmoottorin pakokaasujen lämmönhallintaan (thermal management), sekä myös hiukkassuodattimen regeneroitumisen tutkimiseen. Edellä mainituista syistä johtuen pakokaasujen lämpötilaa on tarpeellista nostaa erilaisin menetelmin. Pakokaasujen lämpötilan nostaminen onnistuu helpoiten rajoittamalla ilmamäärää esimerkiksi ahtimen hukkaporttia säätämällä tai erilaisia ilmankuristimia käyttämällä. Lämpötilaa voi nostaa myös esimerkiksi polttoaineen jälkiruiskutuksella,

mutta tässä työssä keskitytään enimmäkseen ilmamäärän säätöön perustuviin menetelmiin.

Pakoläppätutkimuksessa vertaillaan pakoputkeen asennettavan säädettävän pakoläpän ominaisuuksia jo nykyisin käytössä olevaan imusarjan ja välijäähdyttimen välissä olevaan imuilmankuristimeen niin sanottuun imuläppään. Lämmönhallintatutkimuksessa tutkitaan modifioitujen parametrien vaikutusta pakokaasujen lämpötilaan etenkin transienttisyklin aikana. Regenerointitutkimuksessa keskitytään hiukkassuodattimen regeneroitumisen tutkimiseen käytettäessä modifioituja- ja referenssiparametreja.



## 2 PAKOKAASUJEN JÄLKIKÄSITTELY

Dieselmootoreiden päästöistä oleellisia tässä tutkimuksessa ovat etenkin HC- ja PM-päästöt koska ne kokevat suurimmat muutokset kuristettaessa ilmamäärää. Kuvassa 1 on esitelty stage V -päästönormin raja-arvot.

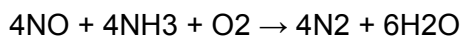
Category	Ign.	Net Power	Date	CO	HC	NOx	PM	PN	
		kW							g/kWh
NRE-w/c-4	CI	37 ≤ P < 56	2019	5.00	4.70 <sup>a,c</sup>			0.015	1×10 <sup>12</sup>
NRE-w/c-5	All	56 ≤ P < 130	2020	5.00	0.19 <sup>c</sup>	0.40	0.015	1×10 <sup>12</sup>	
NRE-w/c-6	All	130 ≤ P ≤ 560	2019	3.50	0.19 <sup>c</sup>	0.40	0.015	1×10 <sup>12</sup>	

Kuva 1. Stage V -päästörajoitukset (Dieselnet 2016a).

### 2.1 SCR-katalysaattori

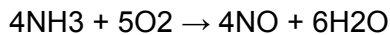
SCR-järjestelmän tehtävä on vähentää typen oksidien määrää pakokaasuissa. Typen oksidit (NOx) kuvaavat polttomootoreissa kahta lajia: typpioksidia (NO) ja typpidioksidia (NO<sub>2</sub>). NO on hajuton, väritön ja verraten myrkytön, kun taas NO<sub>2</sub> on punertavan ruskea, pistävä ja terveydelle haitallinen. NO<sub>2</sub> on haitallinen terveydelle jopa 1 ppm pitoisuuksilla. Ilmakehässä typpioksidia reagoi herkästi hapen kanssa muodostaen typpidioksidia. Typen oksidit muodostuvat palaneen kaasun alueella liekin jälkeen ja pienemmissä määrin myös liekin sisällä. Typen oksidien muodostuminen tapahtuu korkeassa lämpötilassa (yli 1600 °C) tapahtuvien hapen ja typen reaktioiden seurauksena. (Eastwood 2000, 10-12.)

SCR-järjestelmä muuntaa typen oksidit katalyytin avulla typpikaasuksi ja vedeksi. Pelkistimenä käytetään tyypillisesti ureaa, joka ruiskutetaan pakokaasuvirtaan. Pääreaktioyhtälö on esitetty kaavassa 1.



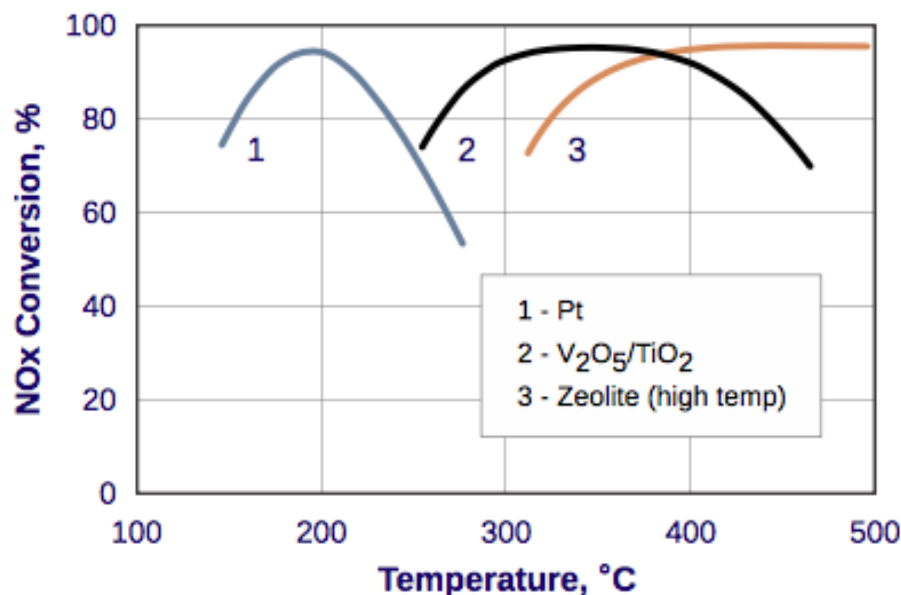
Kaava 1. SCR-reaktioyhtälö (Dieselnet 2016c).

SCR-järjestelmän toimintalämpötila riippuu paljon käytetystä katalyytista. Platina katalyytillä toimivat laitteet menettävät typen oksidien vähennyskyvyn jo noin 250 °C:n lämpötilassa, mikä tekee niistä käyttökelvottomia dieselmootorissa. Vanadia/titaani (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/TiO<sub>2</sub>) -katalyyteillä toiminta lämpötila on laajempi NO<sub>x</sub>-konversion ollessa parhaimmillaan lämpötilalla 250–450 °C. Lämpötilan noustessa korkeammaksi alkaa ammoniakin hapetus, jolloin siitä syntyy haitallista typpioksidia (kaava 2).



Kaava 2. Ammoniakin hapetus (Dieselnet 2016c).

Lämpötila ei myöskään saisi nousta yli 500 °C:n koska anataasinen TiO<sub>2</sub> alkaa muuttua rutiili-muotoon lämpötilan ollessa noin 500–550 °C. Stabiiloimalla katalyytti esimerkiksi volframitrioksidilla voidaan saavuttaa jopa 700 °C:n kestävyys. Korkeanlämpötilan zeoliitti-katalyyteillä NO<sub>x</sub>-konversion heikkenemiselle ei ole lämpötilan ylärajaa. Näille katalyyteille lämpötilan ylärajan asettaa pikemminkin rakenteellinen kestävyys. (Dieselnet 2016c). Toimintalämpötilat käyvät hyvin ilmi kuvasta 2.



Kuva 2. Toimintalämpötilat eri SCR-katalyyteille (Dieselnet 2016c).

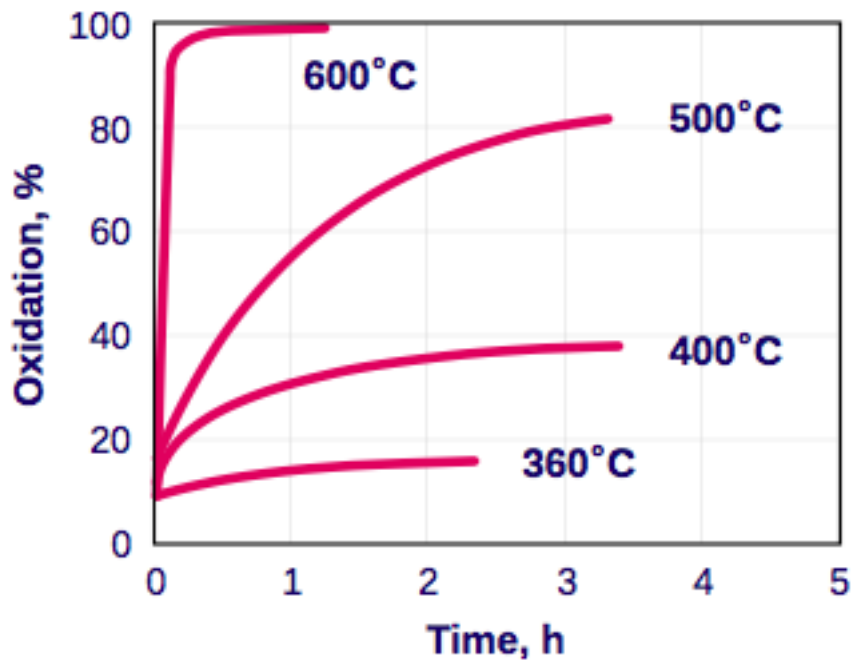
## 2.2 Hiukkassuodatin

Hiukkassuodatin nimensä mukaisesti suodattaa hiukkaspäästöjä ja estää näin niiden pääsyn ilmakehään. Suodatinmateriaalien kehityksen myötä nykyaikaisilla suodattimilla saavutetaan jopa 90 %:n tehokkuus, hyvä lämmönkestävyys sekä mekaaninen kestävyys (Dieselnet 2016d).

Hiukkassuodatin aiheuttaa vastapainetta pakoputkessa ja näin ollen vaikuttaa moottorin toimintaan nostaten hieman ominaiskulutusta. Käytännössä mitä tehokkaampi suodatin on, sitä enemmän se aiheuttaa vastapainetta. Suurempi ongelma on kuitenkin hiukkassuodattimen ominaisuus kerätä nokea (soot) itseensä, joka aiheuttaa vastapaineen nousua edelleen. Noki on säännöllisesti poltettava pois suodattimesta, jotta vastapaine ei nouse liikaa eikä nokea kerääntyisi niin paljoa, että hiukkassuodatinta ei pystyisi normaalein toimenpitein saamaan puhdistettua. Tätä hiukkassuodattimen noienpolttoprosessia kutsutaan regeneroinniksi. (Eastwood 2000, 33.)

Yleisin käytössä oleva suodatinrakenne on niin sanottu wall-flow-rakenne, jossa pakokaasut johdatetaan huokoisen keraamisen materiaalin läpi, jolloin hiukkaset jäävät huokosiin kiinni. Rakenteen tunnistaa helposti hiukkassuodattimen päästä, jossa on useita sisäänmeno kanavia ja yhtä paljon tukossa olevia poistokanavia, jotka ovat auki toisesta päästä. (Dieselnet 2016d.)

Pakokaasujen lämpötila vaikuttaa ratkaisevasti hiukkassuodattimen regeneroitumiseen. Pakokaasujen lämpötilan olisi oltava 550–650 °C -asteisia regeneroitumisen varmistamiseksi. Tällaisiin lämpötiloihin päästään hyvin harvoin, ja vain lyhyissä pätkissä normaalin moottorin käytön aikana. Tyypillisesti työkonedieselmoottorien pakokaasujen lämpötilat ovat alueella 300–450 °C ja rasituksesta riippuen myös tämän alle. Kuvasta 3 käy ilmi regenerointiin tarvittava lämpötila ja aika, kun käytössä ei ole regeneroinnin lämpötilaa laskevia apukeinoja. Alhaisilla lämpötiloilla regeneroituminen on hidasta ja jää vajaaksi. (Dieselnet 2016e.)



Kuva 3. Hiukkassuodattimen regenerointi (Dieselnet 2016e).

Hiukkassuodattimen regeneroimiseksi tarvitaan keinoja, jolla pakokaasujen lämpötilaa nostetaan (aktiivinen regenerointi), ja/tai keinoja, joilla regeneroitumislämpötilaa eli noen syttymislämpötilaa saadaan laskettua, jolloin regeneroituminen tapahtuisi normaalin toiminnan aikana (passiivinen regenerointi).

Tapoja joilla regeneroitumista voidaan nopeuttaa:

- Käytetään katalyyttiä pinnoitteena hiukkassuodattimessa tai lisätään katalyytti polttoaineen lisäaineena.
- NO<sub>2</sub>-määrän lisääminen pakokaasussa käyttämällä hapetuskatalysaattoria (DOC)
- Nostamalla pakokaasujen lämpötilaa moottorinohjauksen avulla (Imukuristus, pakokuristus, jälkiruiskutus ja joissakin tapauksissa erillisillä lämmittimillä)

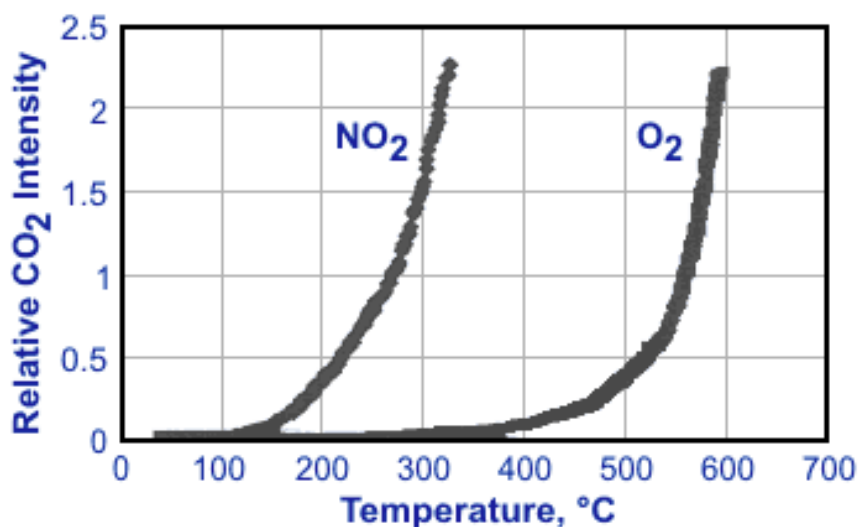
Vaikka käytettäisiin NO<sub>2</sub>- ja katalyyttiavusteista regenerointia, ei välttämättä saada regeneroitumislämpötilaa laskettua niin paljon, että taattaisiin suodattimen regeneroituminen kaikissa olosuhteissa. Usein joudutaan käynnistämään erillinen regenerointijakso (aktiivinen regenerointi), jos pakokaasujen lämpötilat eivät muuten riitä, tässä tilassa pakokaasujen lämpötilaa nostetaan erilaisin menetelmin. (Dieselnet 2016e.)

Sijoittamalla typpioksidia typpidioksidiksi muuntava hapetuskatalysaattori (DOC) hiukkassuodattimen eteen voidaan regeneroitumislämpötilaa laskea huomattavasti. Tällaisen järjestelmän lyhenne on CRT (continuously regenerating trap). Typpidioksidi pystyy hapettamaan hiukkasia tehokkaammin kuin happi. Hiukkaset reagoivat typpidioksidin kanssa alla esitettyjen kaavojen mukaan.



Kaava 3. NO<sub>2</sub>-avusteinen regenerointi (Dieselnet 2016e).

Kun hiukkaset hapetetaan hapen avulla, riittävään tehokkuuteen päästään yli 550 °C:n lämpötiloilla. NO<sub>2</sub>-avusteista regenerointia käytettäessä päästään samaan tehokkuuteen jopa 250 °C:n lämpötiloilla (kuva 4).



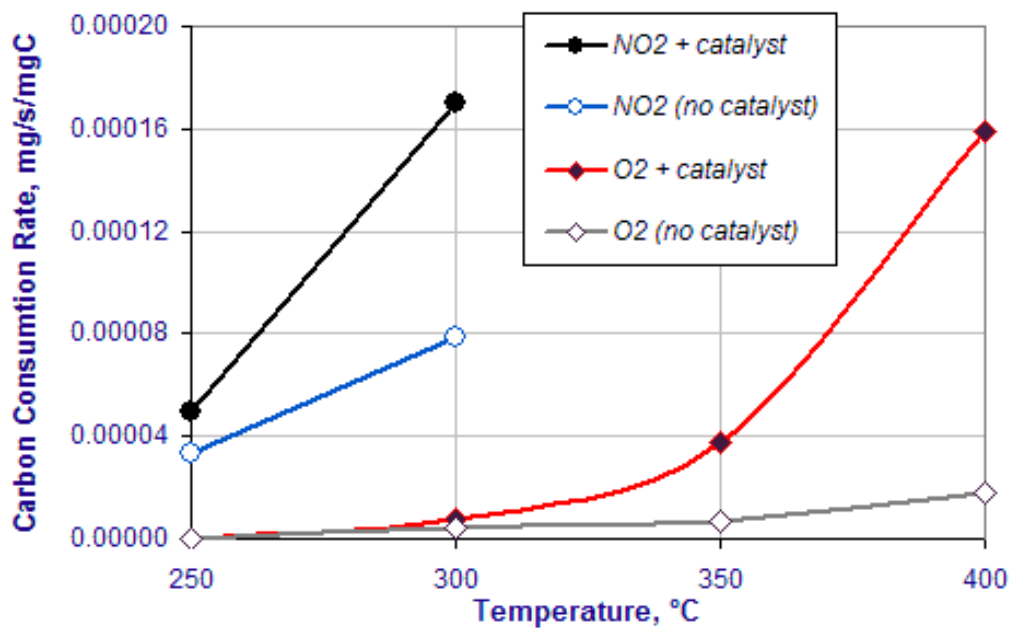
Kuva 4. NO<sub>2</sub>-avusteinen regenerointi (Dieselnet 2016e).

NO<sub>2</sub>-avusteista regenerointia käytettäessä polttoaine saa sisältää maksimissaan 50 ppm rikkiä. Riittävä NO<sub>x</sub>/PM-suhde pakokaasuissa on myös tärkeä, jotta typpidioksidia pystytään muodostamaan hapetuskatalysaattorissa. (Dieselnet 2016e.)

NO<sub>2</sub>-määrät pakoputkessa nousevat käytettäessä kyseistä menetelmää joka toisaalta parantaa SCR-katalysaattorin NO<sub>x</sub>-konversion tehokkuutta alhaisilla lämpötiloilla (Dieselnet 2016c).

Hiukkassuodatin voidaan pinnoittaa katalyytillä, joka parantaa reaktioita kaasujen ja hiukkasten välillä, näin parantaen hiukkassuodattimen regeneroitumista. Lyhenne tällaiselle rakenteelle on CSF (catalyzed soot filter). Katalyyttinä voidaan käyttää esimerkiksi platinaa, ceriumia tai rautaa. Kuvassa 5 nähdään hiukkasten hapetustaso käytettäessä katalysoitua ja ei-katalysoitua menetelmää, NO<sub>2</sub>-avusteisena ja ilman. Testeissä on käytetty OSC (oxygen storage capacity) ominaisuuden omaavaa katalyyttiä (oletettavasti Ce tai Ce/Fe), joka on lisätty polttoaineen lisäaineena. ”Katalysoitua hiukkassuodatinta käytettäessä vaikutus voi olla pienempi johtuen pienemmästä kontaktista hiukkasten ja katalyytin välillä, mutta yleisen trendin uskotaan olevan samanlainen” (Dieselnet 2016f).

Kuvassa 5 huomataan, että 300 °C:n kohdalla NO<sub>2</sub> parantaa huomattavasti ominaisuuksia. Katalyytin käytöllä on myös huomattava vaikutus tässä pisteessä. Hapella hapetettaessa katalyytin vaikutus alkaa vasta suuremmilla lämpötiloilla.



Kuva 5. CSF-NO<sub>2</sub>-regenerointi (Dieselnet 2016f).

### 2.3 Pakoputken vastapaineen vaikutus

Pakoläpän käyttö sekä hiukkassuodatin, etenkin partikkeleista tukkeutuneena, aiheuttaa huomattavan vastuksen pakokaasun virtaukseen. Pakoputken vastapaine on ollut aina tärkeä osa moottorin suunnittelussa, mutta vasta nykypäivän hiukkassuodattimien ja muiden jälkikäsittelyjärjestelmien käytön lisääntymisen jälkeen vastapaineet ovat nousseet niin paljon, että niihin on alettu kiinnittää enemmän huomiota.

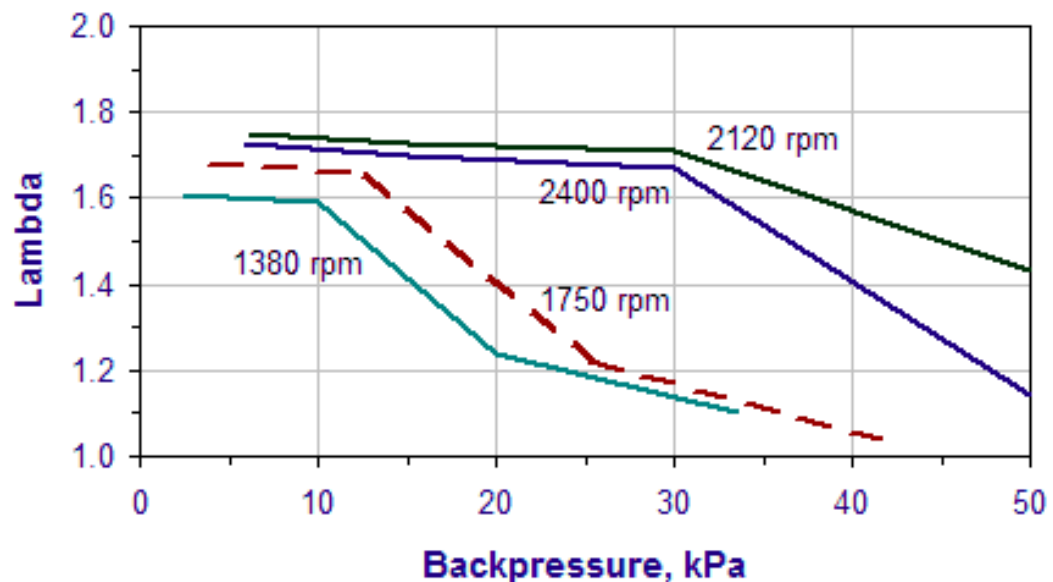
Pakoputken vastapaineen kasvulla on monia vaikutuksia moottorin toimintaan:

- Lisääntynyt pumppaustyön määrä
- Alentunut ahtopaine
- Sylinterin huuhtelun heikkeneminen
- Turboahdin ongelmat

Polttoaineen kulutuksen nousua 1.5–2.5 % per 10 kPa nostettua vastapainetta kohtaan on raportoitu. On syytä muistaa, että kulutuksen nousu riippuu paljon moottorin kuormituksesta, pyörintänopeudesta sekä itse moottorista. Kulutuksen nouseminen on teoreettisesti arveltu johtuvan lisääntyneestä pumppaukseen käytetystä työstä. (Dieselnet 2016g.)

Vaikutus NO<sub>x</sub>-päästöihin ei ole täysin yksiselitteistä. Usein vastapaineen nousulla on NO<sub>x</sub>-päästöjä nostava vaikutus, jota on pidetty hyvin olemattomana. Joissakin tapauksissa NO<sub>x</sub>-päästöjen on raportoitu jopa vähenevän, mahdollisesti palotilaan jääneen pakokaasun vaikutuksesta. (Dieselnet 2016g.)

Tyypillisesti kasvanut vastapaine nostaa PM-, CO- ja HC-päästöjä. Vastapaineen kasvaessa riittävästi aiheuttaa se merkittäviä muutoksia ilman ja polttoaineen suhteeseen. Rikastuminen aiheuttaa tällöin esimerkiksi hiukkaspäästöjen kasvua. Kuvasta 6 voi havaita vaikutuksen lambdaan, sekä myös pyörintänopeuden vaikutuksen. (Dieselnet 2016g.)



Kuva 6. Vastapaineen vaikutus lambdaan (Dieselnet 2016g).



## 3 KOEJÄRJESTELYT

### 3.1 Moottori

Tutkimusmoottorina käytettiin AGCO Powerin valmistamaa moottoria. Moottorilla oli suoritettu muita tutkimuksia ennen lämmönhallintatutkimuksiin siirtymisiä, joten erillisiä sisäänaiovaiheita ei tarvinnut suorittaa. Moottori on nykyaikainen työkonedieselmoottori, joka on varustettu turboahtimella, välijäähdyttimellä sekä yhteispaineruiskutusjärjestelmällä. Moottorin tarkemmat tiedot on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Moottorin tiedot.

Valmistaja	AGCO Power
Tyyppi	74 AWF
Sylinterijärjestys	Rivi 6
Sylinterin halkaisija	108 mm
Iskunpituus	134 mm
Iskutilavuus	7,4 l
Turboahdin	BMTS
Ruiskutusjärjestelmä	Yhteispaineruiskutus

Moottorinohjausjärjestelmänä oli EEM4-ohjelmisto, jolla voitiin muuttaa moottorin parametreja kuten ruiskutus- ja ahtopainekarttoja. Jarrudynamometrin ohjaukseen oli käytössä moottorilaboratorion oma ohjelma.

### 3.2 Jälkikäsittelylaitteisto

Lämmönhallinta- ja regenerointitutkimusten aikana moottorissa oli käytössä pakokaasujen jälkikäsittelylaitteisto. Pakoläppätutkimuksessa laitteisto ei ollut käytössä.

### 3.3 Dynamometri

Moottoria kuormitettiin Schenckin WT 470 -pyörrevirtadynamometrilla, jonka valmistusvuosi on 2003. Dynamometrilla ei saada aikaan negatiivisia kuormia. Dynamometria ohjattiin moottorilaboratorion omalla ohjelmalla.

### 3.4 Mittauslaitteisto

Tutkimuksissa moottorista mitattiin lämpötiloja, massavirtoja, paineita sekä päästöjä. Kaikkien antureiden tiedot kirjautuivat automaattisesti tietokantaan, lukuun ottamatta EEM4-ohjelmasta saatavia parametritietoja, jotka kirjattiin tarvittaessa käsin. Antureiden kalibroinnit oli suoritettu säännöllisin väliajoin.

#### 3.4.1 Pakokaasupäästöt

Kaasumaiset pakokaasunäytteet otettiin pakoputkistosta lämmitetyn näyteputken kautta analysaattoreille. Kaasumaisista päästöistä mitattiin hiilimonoksidi-, hiilidioksidi-, happi-, hiilivety-, ja typpioksidipitoisuudet. Savutus staattisen pisteen ajoissa mitattiin AVL:n FSN-mittarilla. Hiukkasmassamittaus suoritettiin AVL:n MSS-mittarilla. Mittalaitteet on lueteltu taulukossa 3.

Taulukko 2. Pakokaasupäästöjen mittalaitteet.

Hiilimonoksidi (CO)	Siemens	Ultramat 6
Hiilidioksidi (CO <sub>2</sub> )	Siemens	Ultramat 6
Happi (O <sub>2</sub> )	Siemens	Oxymat 61
Hiilivety (HC)	JUM	VE7
Typpioksididi (NO), Typpidioksidi (NO <sub>2</sub> )	ECO PHYSICS	CLD 822 M
Hiukkaset (PM)	AVL	483 MSS
Savutus (FSN)	AVL	415SE G003

FSN-lukema voidaan muuntaa hiukkaspäästöiksi kaavalla:

Hiukkaspäästö (mg/m<sup>3</sup>)=565\*LN(10/10-0,8\*FSN)<sup>1,206</sup>

Kaava 4. FSN-kaava.

Analysaattorit kalibroitiin kalibroitikaasuilla aina ennen mittauksia. Iltapäivällä, mittausten jälkeen, suoritettiin vielä lukemien tarkastus kalibroitikaasuilla.

### 3.4.2 Muut mittalaitteet

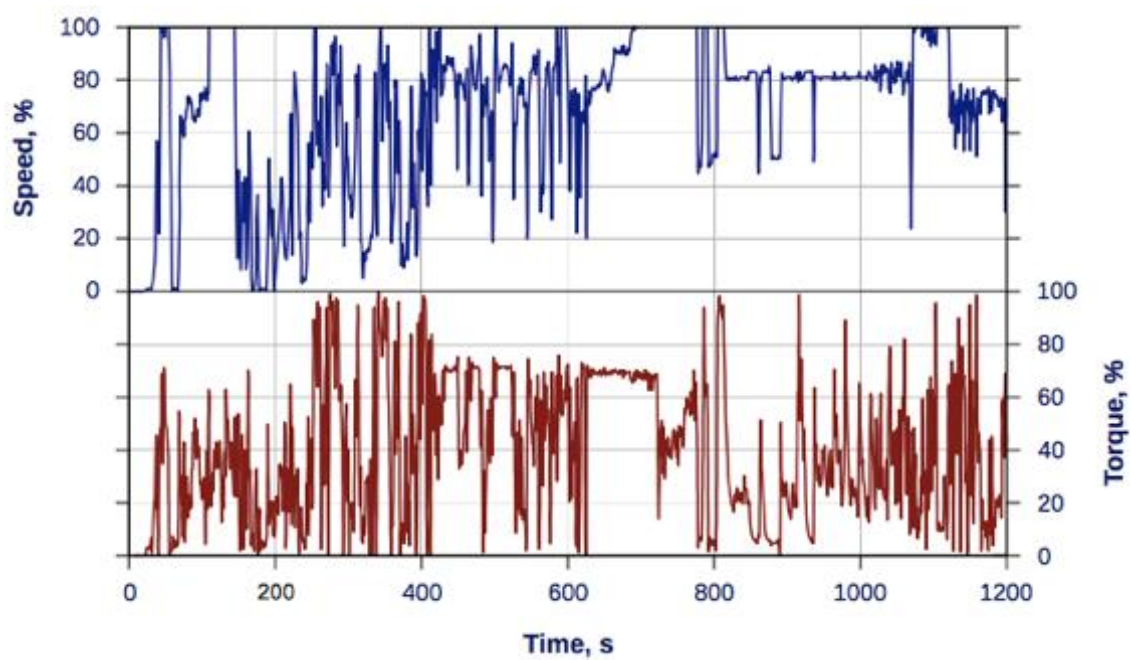
Moottorista mitattiin lämpötiloja K-tyypin sekä PT-100 -tyypin antureilla ja paineita mitattiin venymäliuskaan perustuvilla antureilla. Moottorin ilman massavirtaa mitattiin ABB:n Sensyflow-ilmamäärämittarilla. Vääntömomentti ja pyörimisnopeus saatiin moottoridynamometriltä. Moottoritilan olosuhteita mitattiin Vaisalan mittareilla.

### 3.4.3 Polttoaine

Polttoaineena testeissä käytettiin Neste Oilin kesälaatuista moottoripolttoöljyä. Polttoaineen massavirtaa mitattiin coriolis-mittarilla. Polttoaineen lämpötila pyrittiin pitämään tasaisena erillisellä jäähdyttimellä.

### 3.5 NRTC-sykli

Staatististen ajojen lisäksi tutkimuksissa käytettiin NRTC-sykliä (nonroad transient cycle). Sykli on esitetty kuvassa 9.



Kuva 7. NRTC-sykli (Dieselnet 2016b).

## 4 PAKOLÄPPÄTUTKIMUS

Tulokset on esitelty tutkimuksen tilaajalle toimitetussa versiossa.

## 5 LÄMMÖNHALLINTATUTKIMUS

Tulokset on esitelty tutkimuksen tilaajalle toimitetussa versiossa.

## 6 REGENEROINTITUTKIMUS

Tulokset on esitelty tutkimuksen tilaajalle toimitetussa versiossa.

## 7 YHTEENVETO

Turun ammattikorkeakoulun polttomoottorilaboratorion tiloissa keväällä ja kesällä 2016 suoritettu polttomoottoritutkimus on osa AGCO Powerin tuotekehitystä, jossa etsitään ratkaisuja alati kiristuviin työkonedieselmoottoreiden hiukkaspäästörajoihin. Olennainen osa tässä tutkimuksessa oli siis pakokaasujen lämmönhallinta erilaisin menetelmin (niin sanottu Thermal management). Pakokuristuksen käyttämisen mahdollisuutta pakokaasujen lämpötilan nostamiseen tutkittiin mahdollisena uutena vaihtoehtona. Lisäksi tutkittiin parametreja säätämällä saatavia muutoksia pakokaasujen lämpötilassa ja lopuksi parametreilla suoritettiin vielä regenerointitutkimukset.

Työn teoriaosuudessa perehdyttiin pakokaasujen jälkikäsitteilyjärjestelmiin SCR-järjestelmän ja etenkin hiukkassuodattimen osalta. Pakoläppätutkimuksia silmällä pitäen käsiteltiin myös hieman vastapaineen vaikutusta moottorin toimintaan.

Tutkimusten perusteella pakoläppää voi pitää varteenotettavana vaihtoehtona/lisänä pakokaasujen lämmönhallinnassa. Pakoläppää käyttämällä pystytään tutkimusten perusteella nostamaan pakolämpötilaa siinä missä imuläpälläkin. Nostettaessa pakolämpötiloja alhaisilla kuormilla imuläpällä ongelmaksi koituu lähinnä ilman loppuminen palotapahtumasta ja näin CO- ja HC-päästöjen kasvu, kun taas pakoläpällä ongelmaksi koituu polttoaineen ominaiskulutuksen kasvu. Pakoläpällä hiukkaspäästöt tietyissä pisteissä ovat suuremmat kuin imuläpällä.

Lämmönhallintatutkimuksessa etsittiin sellaisia parametreja, joilla lämmönhallintaa käyttämällä hiukkassuodattimen passiivinen regenerointi olisi mahdollista. Tutkimusten perusteella pakokaasujen lämpötilan nostaminen muutamilla kymmenillä asteilla onnistuu hiukkaspäästöjen kasvun kustannuksella sekä ominaiskulutuksen pienellä kasvulla.

Regenerointitesteissä päästiin näkemään, miten optimoiduilla heatup-parametreilla hiukkassuodatin regeneroituu NRTC-syklien aikana, verrattuna referenssiparametreilla ajettuihin testeihin. Tuloksista huomattiin, että suuremman tehon versiolla hiukkassuodatin regeneroituu jo referenssilläkin, mutta regeneroituminen on huomattavasti nopeampaa modifioituilla parametreilla. Pienemmän tehon versiolla referenssillä regeneroituminen on todella hidasta, jos olematonta, kun taas modifioituilla



parametreilla regeneroitumista tapahtuu, jolloin saavutetaan suuri etu verrattuna referenssiin. Regenerointisyklejä olisi pitänyt jatkaa enemmän, jotta olisi nähty päästäänkö painehäviössä alkutilanteen lähelle.

## LÄHTEET

- Dieselnet 2016a. Nonroad Engines. Viitattu 17.10.2016  
<https://www.dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php>
- Dieselnet 2016b. Nonroad Transient Cycle (NRTC). Viitattu 17.10.2016  
<https://www.dieselnet.com/standards/cycles/nrtc.php>
- W. Addy Majewski. Dieselnet 2016c. Selective Catalytic Reduction. Viitattu 18.10.2016  
[https://www.dieselnet.com/tech/cat\\_scr.php](https://www.dieselnet.com/tech/cat_scr.php)
- W. Addy Majewski. Dieselnet 2016d. Diesel Particulate Filters. Viitattu 20.10.2016  
<https://www.dieselnet.com/tech/dpf.php>
- W. Addy Majewski. Dieselnet 2016e. Diesel Filter Regeneration. Viitattu 21.10.2016  
[https://www.dieselnet.com/tech/dpf\\_regen.php#balance](https://www.dieselnet.com/tech/dpf_regen.php#balance)
- Dieselnet 2016f. Catalyzed Diesel Filters. Viitattu 26.10.2016  
[https://www.dieselnet.com/tech/dpf\\_cat.php](https://www.dieselnet.com/tech/dpf_cat.php)
- Jääskeläinen H. Dieselnet 2016g. Engine Exhaust Back Pressure. Viitattu 28.10.2016  
[https://www.dieselnet.com/tech/diesel\\_exh\\_pres.php](https://www.dieselnet.com/tech/diesel_exh_pres.php)
- Eastwood P. 2000. Critical Topics in Exhaust Gas Aftertreatment. Hertfordshire: Research Studies Press Ltd.